



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108732387 A

(43)申请公布日 2018.11.02

(21)申请号 201710259175.8

(22)申请日 2017.04.20

(71)申请人 中国科学院沈阳自动化研究所
地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街
114号

(72)发明人 刘连庆 滕泽宇 于鹏 杨洋
杨铁 赵亮 李广勇

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限
公司 21002

代理人 王倩

(51)Int.Cl.

G01Q 60/44(2010.01)

G01Q 10/00(2010.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种SICM的探针样品距离控制方法及系统

(57)摘要

本发明涉及一种SICM的探针样品距离控制方法及系统。方法包括：扫描前建立下降沿补偿函数模型；成像过程中记录上一像素行扫描高度，作为当前待扫描行的预测值；将探针实时位置与预测高度的差值作为参数输入到下降沿补偿函数模型，得到下降沿补偿系数；进行上升沿下降沿判断，更新得到新的电流偏差；将新的电流偏差反馈给控制器，控制压电陶瓷上下运动，使探针始终与样品保持恒距。系统包括：逼近曲线模块、下降沿补偿函数模型建立模块、行预测模块、反馈控制模块。本发明解决了逼近曲线非线性所带来的样品上升下降沿偏差不同的问题，因而可以消除SICM成像的下降沿模糊现象，与使用传统PID控制相比成像更加准确。



1. 一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤1、扫描前建立逼近曲线,该逼近曲线为探针和样品间距离与离子电流的关系曲线;利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型,该模型以探针当前位置与工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值为输入,以下降沿补偿系数为输出;

步骤2、扫描过程中将图像上一行的扫描高度作为当前待扫描行的工作点位置;

步骤3、扫描当前行时,采集压电陶瓷的实时位置,将探针当前位置与预测的工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值代入下降沿补偿函数,得到下降沿补偿系数;

步骤4、判断当前位置是否为高度下降沿;若是则将离子电流偏差的比乘以下降沿补偿系数反馈至控制器;

步骤5、控制器输出控制量给压电陶瓷,使探针跟踪样品的形貌高度,与样品表面保持恒定的距离。

2. 按权利要求1所述的一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于,所述利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型具体为:利用逼近曲线通过拟合的方式建立下降沿补偿函数,该函数的输出为下降沿的电流偏差需要增加的倍数。

3. 按权利要求1或2所述的一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于,所述利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型包括以下步骤:

步骤1-2-1、以图像扫描时的电流设定值为中间点,将逼近曲线分成左、右即高度上升和高度下降两部分;

步骤1-2-2、在高度上升和高度下降两部分中,以离子电流与电流设定值之间的电流偏差的绝对值为函数值,以Z轴压电陶瓷电压与电流设定值处所对应的Z轴压电陶瓷电压之差的绝对值为自变量,用来表示探针当前位置到工作点位置的距离,分别做出上升沿和下降沿的电流偏差随Z轴压电陶瓷电压差值的变化曲线;上升沿的电流偏差为正偏差,下降沿的电流偏差负偏差;

步骤1-2-3、以正偏差与负偏差绝对值的比作为函数值,以反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值为自变量,采用最小二乘法进行有理数拟合得到系数,建立下降沿补偿函数。

4. 按权利要求1所述的一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于,所述下降沿补偿函数模型

$$k(d) = (p1 \times d + p2) / (d + q1)$$

其中k(d)为下降沿补偿系数,d为反映探针当前位置与工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值,p1,p2,q1为系数。

5. 按权利要求1所述的一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于,所述步骤4包括以下步骤:

步骤4-1、实时采集离子电流及压电陶瓷电压;

步骤4-2、判断当前扫描点是样品高度的上升沿还是下降沿;

步骤4-3、如果是上升沿则电流偏差保持原来的值不变;否则更新电流偏差为原电流偏差、再乘以下降沿补偿系数k后反馈至控制器。

6. 按权利要求5所述的一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,其特征在于,所述步骤4-2包括:

步骤4-2-1、分别设定一个离子电流偏差值、一个压电陶瓷的电压差值,作为死区;

步骤4-2-2、当电流偏差和均超出死区时,判断为样品高度的下降沿,否则为高度上升沿。

7. 一种SICM探针与样品间距离的自适应控制系统,其特征在于,包括:

逼近曲线模块:设定探针逼近停止点,获得逼近曲线数据;

下降沿补偿函数模型建立模块:设定扫描工作点,以工作点为 midpoint 通过逼近曲线绘制电流偏差随探针到工作点位置的距离变化的曲线,拟合得到正负偏差比值和反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值的关系曲线,建立下降沿补偿函数模型;

行预测模块:保存当前行每一点的高度信息,在对下一行扫描时提供给控制模块作为高度的预测值;

反馈控制模块:用下降沿补偿函数模型处理电流偏差得到新的偏差,将新的偏差输入到PID控制器得到控制量,输出控制量到压电陶瓷控制探针的高度以跟踪样品表面的形貌。

一种SICM的探针样品距离控制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及扫描离子电导显微镜(SICM)成像技术领域,特别涉及一种SICM成像时其探针与样品间距的自适应控制方法及系统。

背景技术

[0002] 扫描离子电导显微镜(scanning ion conductance microscope:SICM)是一种在生物、医药、化学、材料等领域均得到广泛应用的扫描探针显微镜,与传统光学显微镜相比具有分辨率更高的特点,光学显微镜受光学衍射极限的限制分辨率无法达到200nm以下,而扫描探针显微镜以其探针与样品表面的相互作用作为成像依据,不受光学衍射极限的影响,分辨率可达几纳米或几十纳米;SICM与其他扫描探针显微镜相比,其特点在于能够在生理条件下对活细胞进行非力接触的无损观测,同时不需要对样品进行荧光标记等预处理,因而是一种高分辨率、高保真的成像技术,特别适用于对柔软样品如活细胞等的观测。SICM采用一根尖端为锥形、尖端内半径约为几十到几百纳米的超微中空玻璃管作为探针,待测样品放置在灌有电解质溶液样品皿中,探针中也灌有相同的溶液,并且在样品皿和探针中各置有一根AgCl电极,在电极两端施加电压,就会与电解质溶液共同构成电流回路,产生离子电流。当针尖与样品表面距离较远时,离子电流保持在一个恒定值,当探针距离样品足够近,针尖与样品间狭小的缝隙就会阻碍离子的流过,使离子电流减小,离子电流与探针样品的间距存在一一对应的曲线关系,因而可以用电流来表征探针与样品表面的距离。在对样品进行成像时,使探针在样品表面逐行扫过,实时监控电流的大小,通过负反馈控制探针在垂直方向的移动使离子电流维持在一个固定的值,相当于探针在样品表面保持一个恒定的高度,于是记录下探针移动的轨迹即可得到样品表面的三维形貌。

[0003] 现有的SICM探针样品距离控制的方式为普通PID控制,在使用SICM对样品进行的大量成像实验中发现,SICM所成图像存在拖尾现象,表现为当采用某一PID参数时,在样品高度的上升沿处展现了样品的真实形貌,而在高度的下降沿处图像形貌比实际形貌有一定的延长,即在上升沿探针及时的跟踪到了高度的变化,而在下降沿探针跟踪样品高度变化的速度较慢。这一现象影响了SICM对样品形貌的真实反映,使得扫描图像与真实形貌存在一定的偏差。通过分析发现,拖尾现象是由电流逼近曲线的非线性引起的,逼近曲线是探针逐渐逼近样品过程中离子电流变化的曲线,扫描时以逼近曲线中最大值的95%到99%作为设定值,使电流维持在设定值不变。由于逼近曲线的非线性,对于同样的高度变化下,在样品高度的上升沿,作为反馈量的电流偏差较大,而在下降沿,电流偏差较小,此时若采用相同的PID参数就会产生不同的控制量,使得探针跟踪的速度不同,在上升沿能够快速跟踪到样品高度的变化,而在下降沿需要更长的时间才能完成对高度的跟踪,产生了拖尾现象。

发明内容

[0004] 为了解决上述由逼近曲线非线性所引起的SICM成像的下降沿拖尾现问题,本发明提供了一种探针/样品间距的自适应控制方法及系统。

[0005] 本发明采用的技术方案如下：一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法，包括以下步骤：

[0006] 步骤1、扫描前建立逼近曲线，该逼近曲线为探针和样品间距离与离子电流的关系曲线；利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型，该模型以探针当前位置与工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值为输入，以下降沿补偿系数为输出；

[0007] 步骤2、扫描过程中将图像上一行的扫描高度作为当前待扫描行的工作点位置；

[0008] 步骤3、扫描当前行时，采集压电陶瓷的实时位置，将探针当前位置与预测的工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值代入下降沿补偿函数，得到下降沿补偿系数；

[0009] 步骤4、判断当前位置是否为高度下降沿；若是则将离子电流偏差的比乘以下降沿补偿系数反馈至控制器；

[0010] 步骤5、控制器输出控制量给压电陶瓷，使探针跟踪样品的形貌高度，与样品表面保持恒定的距离。

[0011] 所述利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型具体为：利用逼近曲线通过拟合的方式建立下降沿补偿函数，该函数的输出为下降沿的电流偏差需要增加的倍数。

[0012] 所述利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型包括以下步骤：

[0013] 步骤1-2-1、以图像扫描时的电流设定值为中间点，将逼近曲线分成左、右即高度上升和高度下降两部分；

[0014] 步骤1-2-2、在高度上升和高度下降两部分中，以离子电流与电流设定值之间的电流偏差的绝对值为函数值，以Z轴压电陶瓷电压与电流设定值处所对应的Z轴压电陶瓷电压之差的绝对值为自变量，用来表示探针当前位置到工作点位置的距离，分别做出上升沿和下降沿的电流偏差随Z轴压电陶瓷电压差值的变化曲线；上升沿的电流偏差为正偏差，下降沿的电流偏差负偏差；

[0015] 步骤1-2-3、以正偏差与负偏差绝对值的比作为函数值，以反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值为自变量，采用最小二乘法进行有理数拟合得到系数，建立下降沿补偿函数。

[0016] 所述下降沿补偿函数模型

$$[0017] \quad k(d) = (p1 \times d + p2) / (d + q1)$$

[0018] 其中k(d)为下降沿补偿系数，d为反映探针当前位置与工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值，p1, p2, q1为系数。

[0019] 所述步骤4包括以下步骤：

[0020] 步骤4-1、实时采集离子电流及压电陶瓷电压；

[0021] 步骤4-2、判断当前扫描点是样品高度的上升沿还是下降沿；

[0022] 步骤4-3、如果是上升沿则电流偏差保持原来的值不变；否则更新电流偏差为原电流偏差、再乘以下降沿补偿系数k后反馈至控制器。

[0023] 所述步骤4-2包括：

[0024] 步骤4-2-1、分别设定一个离子电流偏差值、一个压电陶瓷的电压差值，作为死区；

[0025] 步骤4-2-2、当电流偏差和均超出死区时，判断为样品高度的下降沿，否则为高度上升沿。

[0026] 一种SICM探针与样品间距离的自适应控制系统，包括：

[0027] 逼近曲线模块:设定探针逼近停止点,获得逼近曲线数据;

[0028] 下降沿补偿函数模型建立模块:设定扫描工作点,以工作点为 midpoint 通过逼近曲线绘制电流偏差随探针到工作点位置的距离变化的曲线,拟合得到正负偏差比值和反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值的关系曲线,建立下降沿补偿函数模型;

[0029] 行预测模块:保存当前行每一点的高度信息,在对下一行扫描时提供给控制模块作为高度的预测值;

[0030] 反馈控制模块:用下降沿补偿函数模型处理电流偏差得到新的偏差,将新的偏差输入到PID控制器得到控制量,输出控制量到压电陶瓷控制探针的高度以跟踪样品表面的形貌。

[0031] 本发明具有如下优点:

[0032] 1、本发明可以消除SICM成像中的下降沿模糊现象。由于逼近曲线的非线性,使样品高度的上升沿和下降沿在同样的距离偏差下产生不同的电流偏差,进而导致控制量不同,使在下降沿探针跟踪形貌的速度较慢,产生了下降沿的模糊现象。本发明增加了下降沿处的电流偏差,使其与对应相同距离的上升沿处的电流偏差大小相同,解决了样品高度上升与下降沿的电流偏差差异,使下降沿获得了同样的探针跟踪速度,当设定某一PID参数使上升沿成像清晰时,下降沿也同样清晰。

[0033] 2、本发明可以避免因PID参数过大而造成的振荡。使用原有的控制方法及系统,在扫描过程中当发现样品的高度下降沿处存在普遍的模糊时,会估计是由于探针跟踪速度过慢而造成的成像模糊,这是就会增大PID参数以加快探针对偏差的响应速度,而同时在上升沿处就会产生更大的控制量,增加超调和振荡的可能,不利于得到真实的形貌,甚至会损坏样品。使用了本发明后,上升沿和下降沿对应相同距离偏差输出的控制量相同,避免了上述情况的发生,更容易得到真实的形貌,同时对样品和仪器都有积极的保护作用。

[0034] 3、本发明可以使成像系统分辨处宽度更小的凹坑特征。对于宽度较小的凹坑形貌,由于在下降沿跟踪速度较慢,探针还没跟踪到凹坑的深度就已经扫过了它的宽度区域,使得在图像中显示为一个比实际深度更浅的凹坑甚至显示为平面。本发明加快了探针对下降沿的响应速度,因此对于这类形貌有更准确的成像能力。

附图说明

[0035] 图1为本发明SICM探针与样品间距离自适应控制方法的流程图;

[0036] 图2为本发明闭环系统控制框图;

[0037] 图3a为本发明探针逼近样品过程中的电流幅值变化曲线图,即逼近曲线图;

[0038] 图3b为本发明探针逼近样品过程的电流偏差幅值曲线图;

[0039] 图3c为本发明下降沿补偿函数模型曲线图;

[0040] 图4为本发明具体实施方式中步骤3的流程图;

[0041] 图5为本发明方法与普通PID控制方法对高度阶跃的响应特性曲线对比图;

[0042] 图6a为使用普通PID控制系统的成像结果;

[0043] 图6b为使用自适应距离控制系统下的成像结果;

[0044] 图6c为两个成像结果的截面曲线图。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图对本发明做进一步详述。

[0046] 一种SICM的探针与样品间距离自适应控制方法,包括:

[0047] 步骤1、在开始扫描前做逼近曲线,该逼近曲线为探针/样品距离与离子电流的关系曲线,利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型,该模型以探针当前位置与工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值为输入,以对应相同距离的上升沿和下降沿电流偏差的比为输出;

[0048] 步骤2、扫描过程中记录图像上一行的扫描高度,作为当前待扫描行的预测高度;

[0049] 步骤3、扫描当前行时,采集压电陶瓷的实时位置,将探针当前位置与预测的工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值作为参数代入下降沿补偿函数模型,得到下降沿补偿系数;

[0050] 步骤4、判断当前位置是否为高度下降沿,若是则将反馈电流偏差乘以下降沿补偿系数作为反馈回路中新的偏差输送给控制器;

[0051] 步骤5、控制器输出控制量给执行机构压电陶瓷,使探针跟踪样品的形貌高度,与样品表面保持恒定的距离。

[0052] 所述步骤1包括:

[0053] 步骤1-1、获得探针/样品距离与电流关系的全貌逼近曲线,该曲线反应了离子电流从最大值减小到接近为零的全部过程;

[0054] 步骤1-2、利用逼近曲线通过拟合的方式建立下降沿补偿函数模型,该函数的输出为下降沿的电流偏差需要增加的倍数。

[0055] 所述步骤1-2包括:

[0056] 步骤1-2-1、以图像扫描时的电流设定值(95%-99%)为中间点将逼近曲线分成左右即高度上升和高度下降两部分;

[0057] 步骤1-2-2、在高度上升和高度下降两部分中,以离子电流与电流设定值之间的电流偏差的绝对值为函数值,以Z轴压电陶瓷电压与电流设定值处所对应的Z轴压电陶瓷电压之差的绝对值为自变量,分别做出上升沿和下降沿的电流偏差随Z轴压电陶瓷电压差值的变化曲线;

[0058] 步骤1-2-3、以正偏差与负偏差绝对值的比作为函数值,以探针当前位置与工作点位置的Z轴压电陶瓷电压差值为自变量,采用最小二乘法进行有理数拟合得到系数,建立下降沿补偿函数模型。

[0059] 所述步骤3包括:

[0060] 步骤3-1、实时采集压电陶瓷的电压代表探针的当前位置;

[0061] 步骤3-2、将探针当前位置与该点预测高度位置的压电陶瓷电压相减,得到代表当前位置与预测工作点位置距离的电压差值;

[0062] 步骤3-3、将探针当前位置与预测工作点位置的电压差值作为自变量代入下降沿补偿函数模型,得到下降沿补偿系数K。

[0063] 所述步骤4包括:

[0064] 步骤4-1、实时采集离子电流及压电陶瓷电压;

[0065] 步骤4-2、判断当前扫描点是样品高度的上升沿还是下降沿;

[0066] 步骤4-3、如果是上升沿则电流偏差保持原来的值不变,如果是下降沿则更新电流

偏差为原电流偏差乘以下降沿补偿系数K。

[0067] 所述步骤4-2包括：

[0068] 步骤4-2-1、设定一个离子电流偏差值和一个压电陶瓷的电压差值作为电流死区和电压死区；

[0069] 步骤4-2-2、当电流偏差和电压差值分别超出电流死区和电压死区时，判断为样品高度的下降沿，否则为高度上升沿。

[0070] 一种SICM的探针与样品间距离自适应控制系统，包括：

[0071] 逼近曲线模块：设定探针逼近停止点，获得逼近曲线数据；

[0072] 下降沿补偿函数模型建立模块：设定扫描工作点，以工作点为 midpoint 通过逼近曲线绘制电流偏差随探针到工作点位置的距离变化的曲线，拟合得到正负偏差比值和反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值的关系曲线，建立下降沿补偿函数模型；

[0073] 行预测模块：保存当前行每一点的高度信息，在对下一行扫描时提供给控制模块作为高度的预测值；

[0074] 反馈控制模块：用下降沿补偿函数模型处理电流偏差得到新的偏差，将新的偏差输入到PID控制器得到控制量，输出控制量到压电陶瓷控制探针的高度以跟踪样品表面的形貌。

[0075] 本发明为一种SICM探针与样品间距离的新的控制方法，如图1：通过逼近曲线建立下降沿补偿函数模型，结合行预测的方法，实时更新下降沿补偿系数，进而将下降沿处的电流偏差增加到与上升沿同样的水平，消除逼近曲线非线性对下降沿成像的影响。图2为本系统的控制回路框图。

[0076] 所述一种SICM探针样品间距离的自适应控制方法包括以下步骤：

[0077] 步骤1、在开始扫描前做逼近曲线，该逼近曲线为探针/样品距离与离子电流的关系曲线，利用逼近曲线建立下降沿补偿函数模型，该模型以探针当前位置与工作点位置的压电陶瓷电压差值为输入，以对应的上升沿和下降沿电流偏差的比为输出；

[0078] 所述步骤1包括：

[0079] 步骤1-1、如图3a所示，获得探针/样品距离与电流关系的全貌逼近曲线，设置探针逼近的停止条件为离子电流达到最大电流的10%-30%，该曲线反应了离子电流从最大值减小到接近为零的全部过程；

[0080] 步骤1-2、利用逼近曲线通过拟合的方式建立下降沿补偿函数模型，该模型的输出为下降沿的电流偏差需要增加的倍数。

[0081] 所述步骤1-2包括：

[0082] 步骤1-2-1、以图像扫描时的要使用的电流设定值为中间点即分界点，设定值通常为探针与样品表面距离较远（电流恒定且最大）时电流的95%-99%，将逼近曲线分成左右两部分，左边代表样品高度下降沿的情况，右边代表样品高度上升沿的情况；

[0083] 步骤1-2-2、如图3b所示，以离子电流与电流设定值之间的电流偏差的绝对值为函数值，以Z轴压电陶瓷电压与电流设定值处所对应的Z轴压电陶瓷电压之差的绝对值为自变量，用来表示探针当前位置到工作点位置的距离，分别做出上升沿和下降沿的电流偏差随Z轴压电陶瓷电压差值的变化曲线，代表了探针位于样品的上升沿和下降沿时的电流偏差与

压电陶瓷电压差值的关系；

[0084] 步骤1-2-3、如图3c所示，以正偏差与负偏差绝对值的比作为函数值，以反映探针当前位置到工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值为自变量，采用最小二乘法进行有理数拟合得到系数，建立下降沿补偿函数：

$$[0085] \quad k(d) = (p1 \times d + p2) / (d + q1) \quad (1)$$

[0086] 其中k(d)为下降沿补偿系数，d为反映探针当前位置与工作点位置距离的Z轴压电陶瓷电压差值，p1, p2, q1为系数，通过逼近曲线由有理数拟合得到。

[0087] 步骤2、扫描过程中记录代表图像上一像素行扫描高度的压电陶瓷电压，作为当前待扫描像素行高度的预测，

$$[0088] \quad h_p(x, y) = h(x, y-1) \quad (2)$$

[0089] 其中(x, y)表示为图像中的第x行、第y列的像素点，h_p为预测高度，h为扫描高度；

[0090] 步骤3、扫描当前行时，采集压电陶瓷的实时位置，将预测目标位置和当前实时位置处的压电陶瓷电压差值作为参数代入下降沿补偿函数模型，得到下降沿补偿系数，如图4。如果当前扫描行为图像的第一行，则仅使用普通PID控制方法进行扫描，不进行行预测的过程；

[0091] 所述步骤3包括：

[0092] 步骤3-1、实时采集压电陶瓷的电压代表探针的当前位置h_{z_piezo}；

[0093] 步骤3-2、将当前位置的高度与该点预测高度相减，得到当前位置与工作点位置的距离d，用Z轴压电陶瓷的电压差值来表示：

$$[0094] \quad d(t) = h_{z_piezo}(t) - h_p(x, y) \quad (3)$$

[0095] 步骤3-3、将当前位置与工作点位置的距离作为自变量代入下降沿补偿函数模型，得到下降沿补偿系数k。

[0096] 步骤4、判断当前位置是否为高度下降沿，若是则将反馈电流偏差乘以下降沿补偿系数作为反馈回路中新的偏差输送给控制器；

[0097] 所述步骤4包括：

[0098] 步骤4-1、实时采集离子电流及压电陶瓷电压；

[0099] 步骤4-2、判断当前扫描点是样品高度的上升沿还是下降沿；

[0100] 所述步骤4-2包括：

[0101] 步骤4-2-1、为避免噪声的影响及两行之间高度突变的影响，设置一个电流死区i_{deadzone}，为避免压电陶瓷振动的影响设置一个压电陶瓷距离死区d_{deadzone}；

[0102] 步骤4-2-2、下降沿判定条件：

$$[0103] \quad \left. \begin{array}{l} h_{z_piezo}(t) - h_p(x, y) > d_{deadzone} \\ i(t) - i_{sp} > i_{deadzone} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{downward}, \quad (4)$$

else, upward

[0104] 步骤4-3、如果是上升沿则电流偏差保持原来的值不变，如果是下降沿则更新电流偏差为原电流偏差乘以下降沿补偿系数k。

$$[0105] \quad e(t) = k(d(t)) \times (i(t) - i_{sp}) \quad (5)$$

$$[0106] \quad k(d) = \begin{cases} 1 & , \text{upward} \\ (p1 \times d + p2) / (d + q1) & , \text{downward} \end{cases} \quad (6)$$

[0107] 其中,upward和downward分别表示上升沿和下降沿, $e(t)$ 表示新的电流偏差, $i(t)$ 表示反馈量即离子电流, i_{sp} 表示电流设定值。

[0108] 步骤5、控制器输出控制量给执行机构压电陶瓷,使探针跟踪样品的形貌高度,与样品表面保持恒定的距离。

[0109] 为验证本发明在使用SICM系统成像时对探针样品间距离的控制性能,进行了对高度阶跃的响应特性实验及对标准PDMS栅格样品的成像实验。在扫描过程中手动给予样品一个向下的高度阶跃,分别采用上述自适应控制方法和普通PID控制方法,记录探针跟踪高度变化的过程,记录响应特性曲线。使用纳米平台令样品产生一个1微米的下降沿,如图5,分别使用普通PID和自适应控制让探针对其进行跟踪,两种情形采用的PID参数相同,普通PID控制方法探针跟踪的轨迹为右边斜率较小的曲线,完成跟踪的时间大于100ms,使用自适应控制方法探针跟踪的轨迹为左边斜率较大的曲线,完成跟踪的时间小于10ms,因而采用SICM探针样品间距离的自适应控制方法使得探针对下降沿的跟踪速度更快,明显优于普通PID控制方法。

[0110] 图6a-图6c为本发明控制系统下对栅格的扫描结果与普通PID控制系统下的扫描结果比较图;图6a-图6b分别采用普通PID和自适应控制对栅格样品扫描,两者采用的PID参数均相同。扫描用的栅格样品每个栅格宽 $5\mu\text{m}$,深200nm,材料选用聚二甲基硅氧烷(PDMS)。使用普通PID控制扫描出的图像在左边栅格上升沿处清晰,但在右边下降沿处比较模糊,如图6a;使用自适应控制扫描出的图像在左边栅格上升沿处的成像效果与使用PID控制时一致,但在右边下降沿处更加清晰,消除了拖尾的现象,如图6b。在同一位置对两幅图像做切面图,显示出本发明的方法使得栅格下降沿处的高度曲线与原方法相比更加陡峭,更接近于真实的形貌,如图6c,验证了其控制性能的优势。

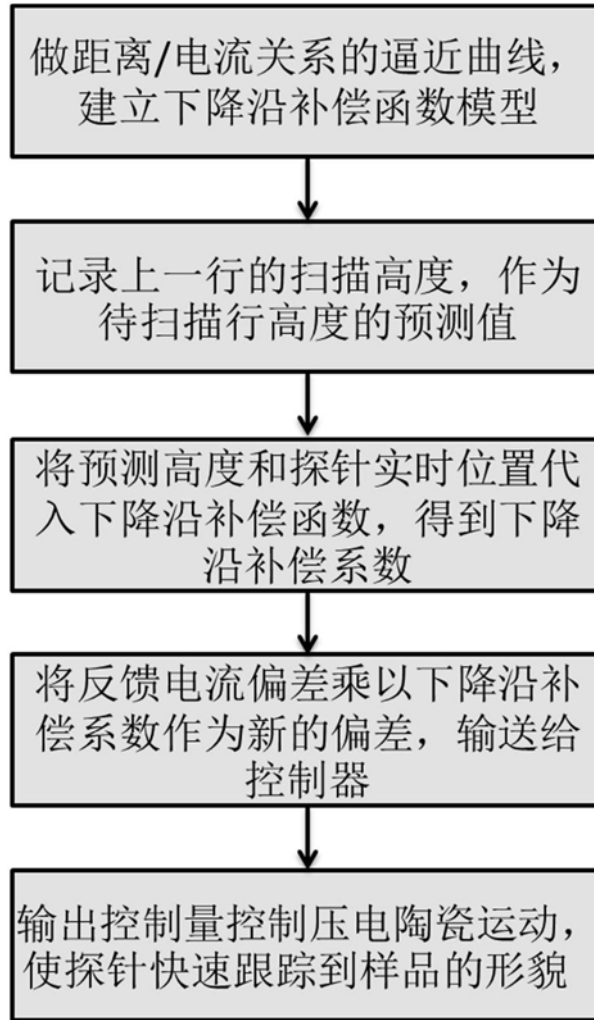


图1

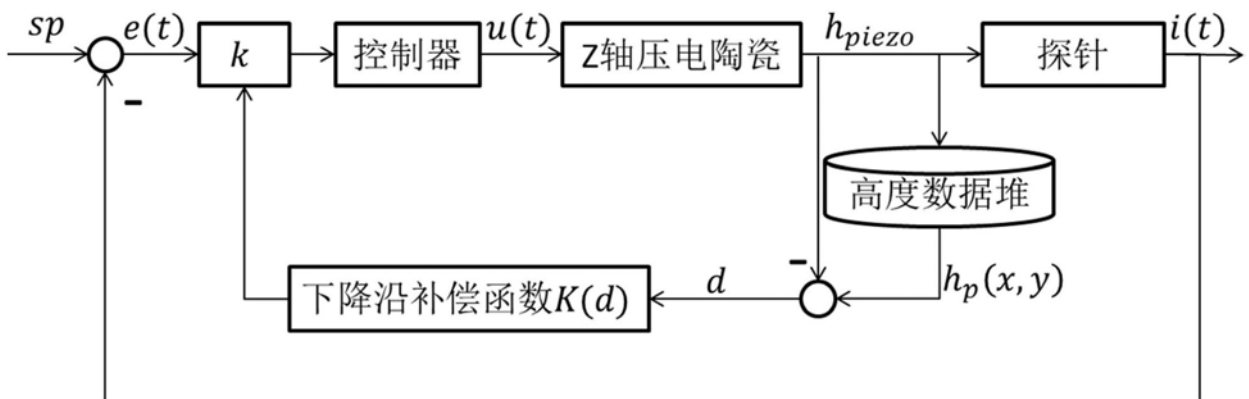


图2

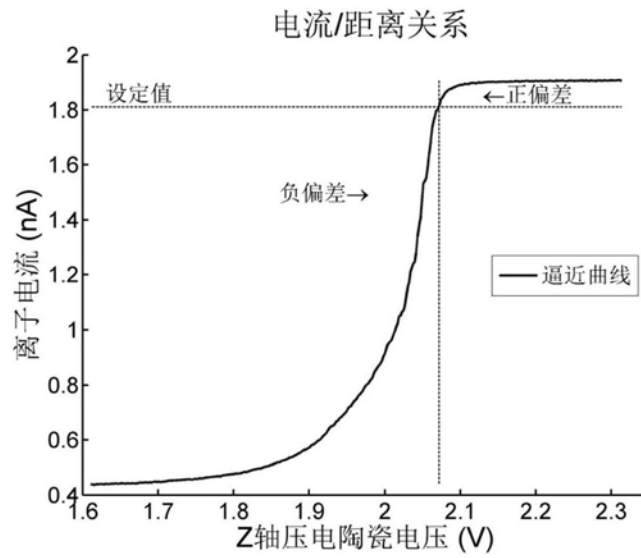


图3a

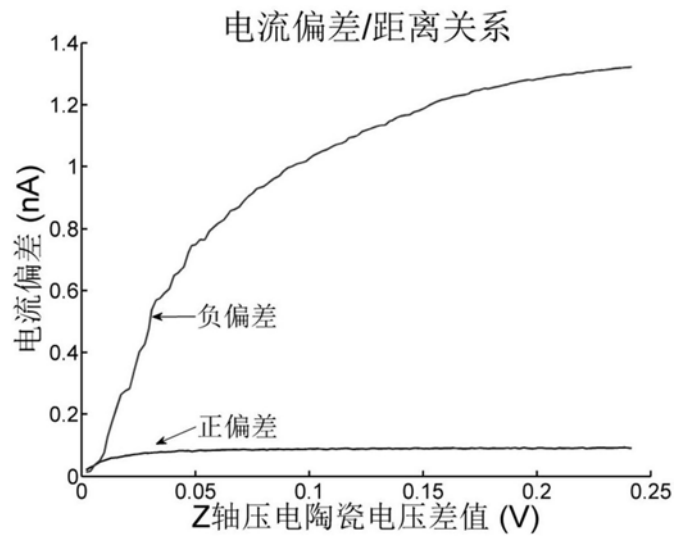


图3b

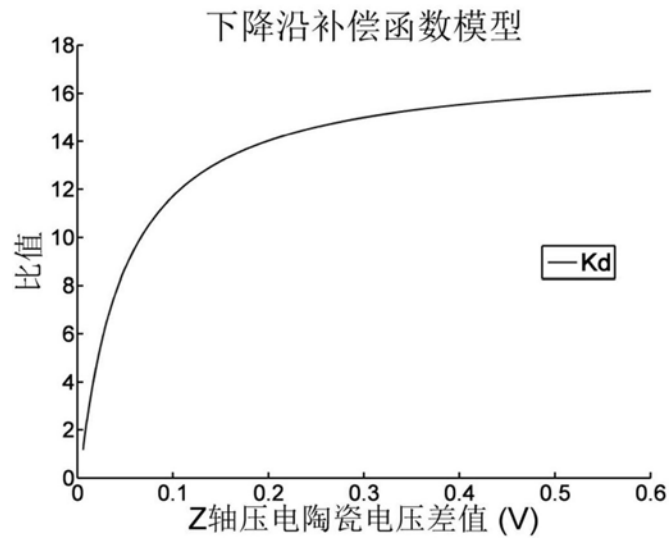


图3c

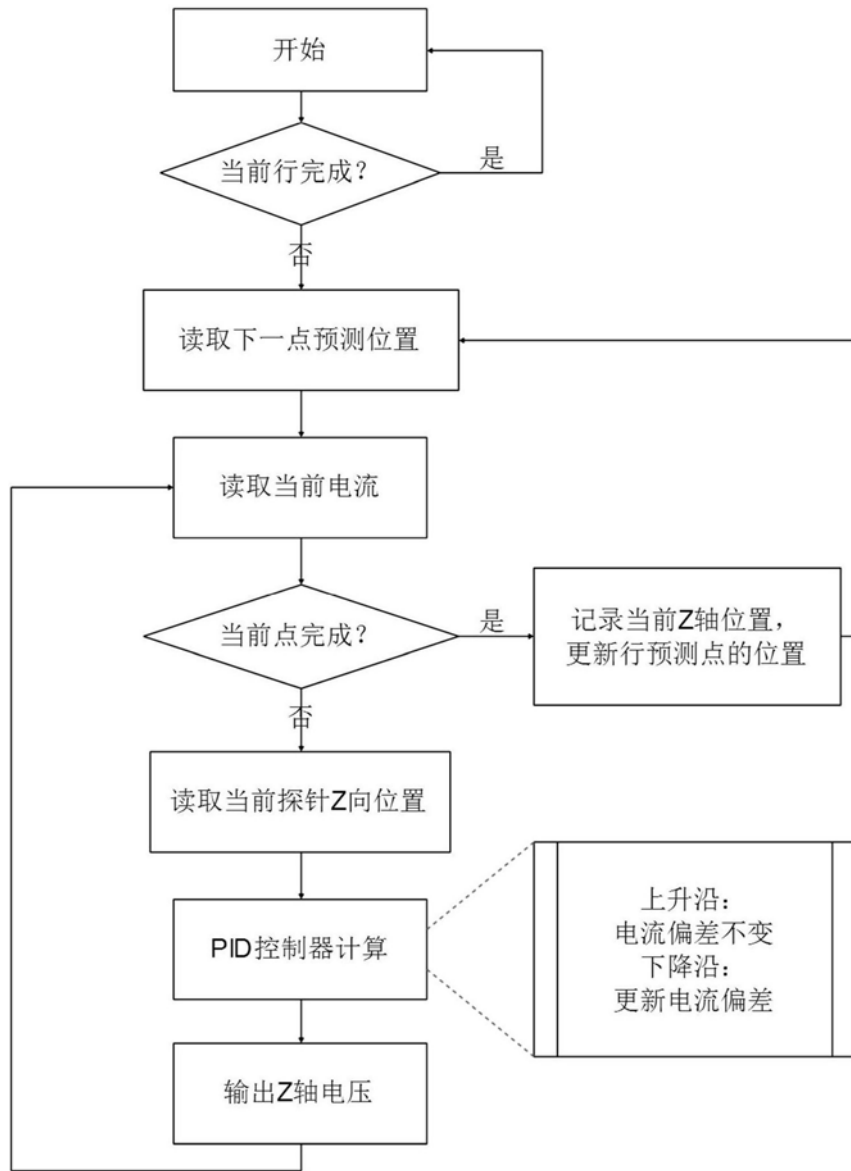


图4

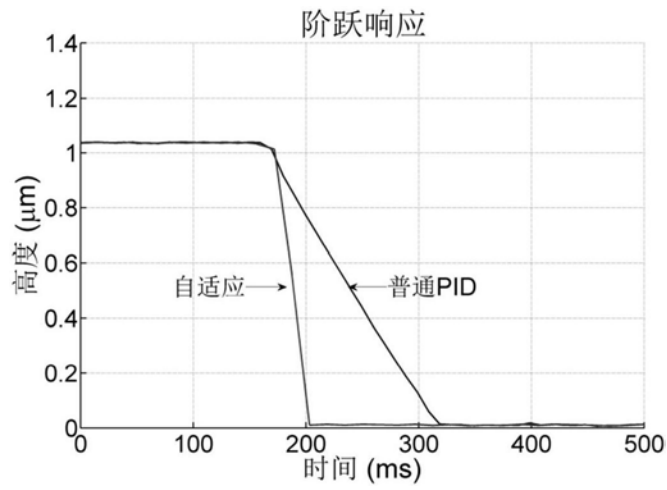


图5

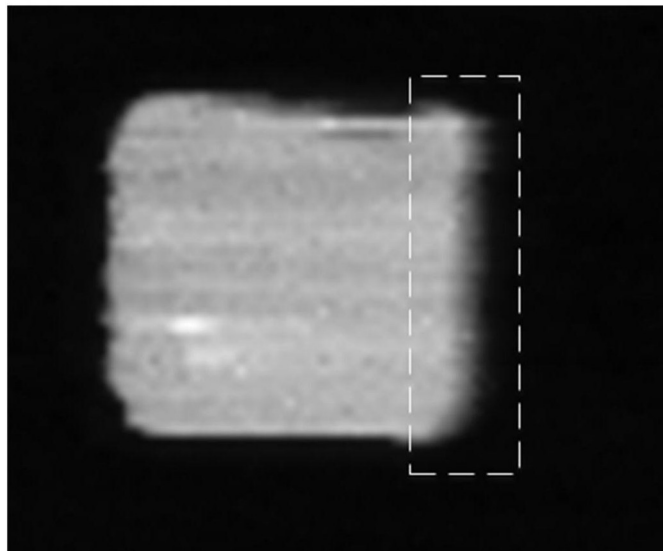


图6a

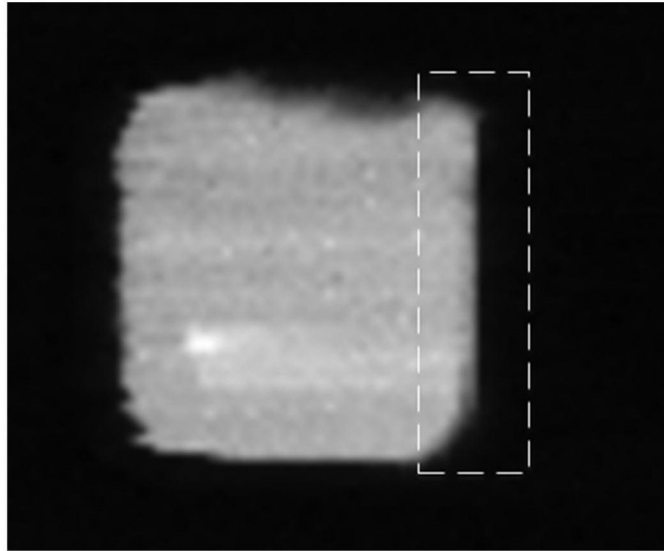


图6b

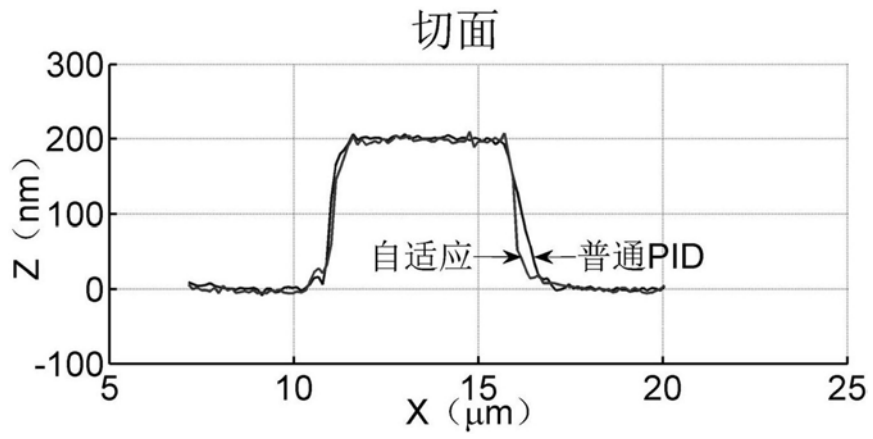


图6c